

〈論 文〉

표면 응력구배시의 잔류응력 측정에 관한 연구

이택순* · 최병길** · 전상윤***

(1990년 3월 13일 접수)

A Study on the Measurements of Residual Stress in the Field of Surface Stress Gradient

Taik Soon Lee, Byung Kill Choi and Sang Youn Jeon

Key Words : Residual Stress(잔류응력), Stress Gradient(응력구배), Hole Drilling Method(구멍뚫기 방법), Air-Abrasive Jet Machine(공기연마 분사기), Relieved Strain Coefficient(변형률 이완상수), 4-point Bending Specimen(4-점 굽힘시편)

Abstract

In residual stress measurement by the hole drilling method, efforts have been made to find the accurate values for the relieved strain coefficient. The relieved strain coefficients may be obtained from Kirsch solution, FEM analysis and experimental works. In this paper, loading strain and relieved strain are measured by 4-point bending specimens. Loading strain in the specimen may represent stresses which vary along with the gage surface but not with the hole depth. Loading stress also has to be calculated by taking account of stress gradient along the gage length. Relieved strain due to hole drilling coincides with loading stress acting on the rosette center despite of the steep stress gradient. Measurement error of hole diameter is also analyzed for improved measurement of residual stress. Measurement of hole diameter would be done in accuracy of 0.02mm.

1. 서 론

구조물에 존재하는 잔류응력은 압연, 절삭, 소성 가공 및 용접 등에 의하여 발생하는 응력으로서 외부하중이 없는 상태에서도 존재하는 응력이다. 특히 용접 및 용사에 의한 잔류응력은 용접변형, 취성파괴, 피로파괴 및 좌굴강도 등에 영향을 미친다. 이러한 영향을 정확히 평가하기 위해 정확한 잔류응력의 계측 기법이 활발히 이루어져왔다. 계측기법 중 응력이완법의 일종인 구멍뚫기 방법

(HDM, hole-drilling method)은 1934년 Mathar⁽¹⁾에 의하여 제안된 이후 지금까지 많은 연구자에 의하여 발전되어 왔다. 구멍뚫기 방법의 기본 이론은 Kirsch해⁽²⁾에 근거하고 있으며, 엄밀한 의미에서 Kirsch해는 균일평면 응력이 걸린 무한 평판에 관통형 구멍을 뚫었을 때에 적용될 수 있다. 그러나 구멍뚫기 방법을 이용한 잔류응력 측정시 대부분 막힌 구멍(blind hole)을 뚫었을 때 이완되는 스트레인을 계측하여 잔류응력을 계측한다. Schajer⁽³⁾는 막힌 구멍에서 이완되는 스트레인이 관통구멍에서 이완되는 스트레인과 같지 않음을 유한요소법을 사용하여 제시하고 있다. 응력구배가 있을 때 또는 구멍주위에서 응력분포가 균일하지 않을 때 스트레인 게이지의 미소면적에 걸리는 스트레인을 스트레

*정회원, 영남대학교 공과대학 정밀기계과

**정회원, 해사기술연구소

***영남대학교 대학원

인 게이지의 전면적에 대하여 적분하는 것을 Kabiri⁽⁴⁾는 제안하고 있다.

본 연구에서는 4-점 굽힘시험 장치를 이용하여 구멍의 표면에서 응력구배를 발생했을 때(구멍의 깊이 방향으로 응력구배가 없음), 구멍을 뚫기전 표면의 응력구배를 고려하여 산정한 하중상태와 구멍을 뚫은 후 이완되는 잔류응력을 비교하였다. 또한 잔류응력 측정시 구멍의 진원도에 대하여 실험적으로 연구하였으며, 구멍 직경의 측정오차가 잔류응력 측정에 미치는 영향을 분석하였다. 연구결과 4-점 굽힘시험시 하중상태는 응력구배를 고려하여 계측되어야 하며, 응력구배장에서의 잔류응력을 로젯트 게이지 중심에 존재하는 균일응력으로 나타낼 수 있다.

2. 이완 스트레인과 잔류응력과의 관계식에 대한 검토

평면응력 상태의 얇은 무한판에 원형의 관통 구멍을 뚫었을 때 구멍 주위에는 응력의 재분포가 일어나며 아울러 스트레인의 변화가 일어난다. 이 스트레인의 변화는 스트레인 게이지에 의해 계측될 수 있는 양이며 Kirsch⁽²⁾에 의해 정확한 해가 주어졌다.

$$\epsilon_r = \sigma_1(A + B\cos 2\theta) + \sigma_2(A - B\cos 2\theta) \quad (1)$$

단, ϵ_r : 스트레인게이지가 반경방향으로 배열됐을 때 잔류응력의 이완으로 계측되는 스트레인

σ_1, σ_2 : 평면응력 상태에서의 주응력

θ : 주응력(σ_1)과 스트레인 게이지가 이루는 각

$$A = -\frac{1+\nu}{2E} \cdot \rho^2$$

$$B = -\frac{1+\nu}{2E} \left(\frac{4}{1+\nu} \cdot \rho^2 - 3\rho^4 \right)$$

ν : 프와송 비

E : 재료의 탄성계수(kg/mm²)

$$\rho = a/r_m$$

a : 구멍의 반지름(mm)

r_m : 구멍중심에서 게이지 중심까지의 거리(mm)

식(1)로 표시되는 응력-스트레인 관계식을 직교 3축형 로젯트 스트레인게이지의 각각의 게이지에 대하여 적용하면

$$\sigma_1 = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{4A} - \frac{\epsilon_1 - \epsilon_3}{4B} \cos 2\theta$$

$$\sigma_2 = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{4A} + \frac{\epsilon_1 - \epsilon_3}{4B} \cos 2\theta \quad (2)$$

$$2\theta = \tan^{-1} \frac{\epsilon_3 - 2\epsilon_2 + \epsilon_1}{\epsilon_3 - \epsilon_1}$$

단, $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$: 잔류응력 이완에 따른 로젯트 스트레인 게이지 각각의 스트레인 계측값

한편 식(1)로 표시되는 스트레인은 엄밀한 의미에서 게이지의 중앙인 점에 대한 스트레인을 나타내는 것이다.

Kabiri는 일정한 면적을 갖는 스트레인 게이지에 대하여 A 와 B 를 엄밀한 것으로 부터 덜 엄밀한 방법까지 여러가지로 계산하였다⁽⁴⁾. 무한 평판에 관통형의 원형 구멍을 뚫었을 때, 구멍 주위에 위치한 가로 l , 세로 $2d$ 인 스트레인 게이지(Fig. 4 참조)내의 임의의 점은 서로 다른 응력 상태에 놓이게 된다. Kabiri는 첫째, 스트레인 게이지내의 임의의 응력상태에서 이완되는 스트레인을 구하고 이 스트레인을 게이지의 전면적에 대하여 적분하여 평균치를 구하였다(Fig. 1에서 a 로 표시됨). 둘째로, 스트레인 게이지는 여러개의 필라멘트로 구성된 격자(grid)구조이기 때문에 스트레인의 적분을 필라멘트에 국한시켰다. 이 방법은 스트레인게이지의 실제 구조를 감안한 것이기 때문에 가장 엄밀한 계산으로 생각할 수 있다. Fig. 1에서 b 로 표시됨. Fig. 1에서 c 로 표시되는 곡선은 스트레인 게이지를 하나의 점으로 간주하여 얻은 것이며 식(1)에

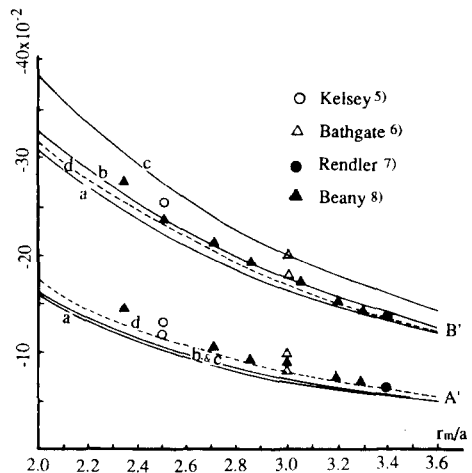


Fig. 1 Relieved Strain Coefficients for HDM⁽⁹⁾

서 $E.A$ 및 $E.B$ 값에 해당한다.

Fig. 1중 d 로 표시된 곡선은 두께 방향으로 균일한 응력이 걸리는 두꺼운 시료에 대한 끝이 막힌 구멍(blind hole)을 뚫었을 때 스트레인 게이지 표면에서 이완되는 스트레인을 Schajer⁽³⁾가 유한 요소법으로 구한 것이다. Schajer는 유한요소해석법을 통하여 구멍깊이에 따라 변하는 스트레인 이완 상수인 C_1 과 C_2 를 결정하였다. 일단 C_1 과 C_2 가 결정되면 잔류응력은 식 (3)에 의해 결정된다.

$$\sigma_1, \sigma_2 = \frac{E}{2(1+\nu)} \frac{1}{C_1} (\epsilon_1 + \epsilon_3) \mp \frac{E}{\sqrt{2}C_2} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_1 - \epsilon_3)^2} \quad (3)$$

상수 C_1 은 응력계측 대상구조물의 재료특성(예: 탄성계수, 프와송비 ν)과는 관련이 없는 무차원화된 것이다. 한편 C_2 역시 무차원된 상수로서 구멍의 크기, 구멍의 형상 및 깊이와 프와송비에 의하여 결정된다. 프와송비가 0.25에서 0.35까지 변할때 C_2 의 변화율은 2%미만인 것으로 알려졌다. 따라서 일단 유한요소법 해석에 의하여 C_1 및 C_2 가 결정되면, 철강 또는 알루미늄 등 서로 다른 재료로된 구조물의 잔류응력 측정이 동일한 식 (3)에 의해 가능하다. 한편 Kelsey⁽⁵⁾, Bathgate⁽⁶⁾ 및 Rendler⁽⁷⁾는 현재 잔류응력 측정용으로 많이 사용되는 것과는 약간 다른 로젯트 스트레인 게이지를 사용하여 계측된 스트레인과 작용하는 응력사이의 관계식을 실험적으로 구하였다. 또한 Beany⁽⁸⁾는 공기 연분사법으로 뚫은 끝이막힌구멍에 의한 표면에서의 스트레인 이완과 작용응력과의 관계식을 실험적으로 구한 K_1 과 K_2 를 사용하여 표시하였다. Beany에 의하면 잔류응력은 계측된 스트레인으로부터 식 (4)에 의하여 계산된다.

$$\sigma_1, \sigma_2 = \frac{E}{2(K_1 + \nu K_2)} (\epsilon_1 + \epsilon_3) \mp \frac{E}{\sqrt{2}(K_1 + \nu K_2)} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2} \quad (4)$$

단, $K_1 = \epsilon_{AH} / \epsilon_A$

$$\nu K_2 / K_1 = -\epsilon_{TH} / \epsilon_{AH} \approx 0.3$$

ϵ_A : 보를 사용한 보정시험에서 보의 축방향 스트레인

ϵ_{AH} : 보에 구멍을 뚫었을 때 게이지가 읽는 축방향 스트레인

ϵ_{TH} : 보에 구멍을 뚫었을 때 게이지가 읽는 횡방향 스트레인

Beany에 의하면 K_1 및 K_2 가 재료특성과는 관련

이 없고, 구멍의 크기에 의해 결정된다. 그러나 Beany의 $1/K_1$ 은 식 (2)에서 나타낸 $1/E(A+B)$ 값과 5%범위안에서 상호 일치한다.

지금까지 많은 연구자에 의해 주로 연구된 내용은 두께 방향으로 응력구배가 없고 스트레인 게이지가 부착되는 평면에서도 응력구배가 없는 응력장에서 잔류응력을 측정하는 것이었다. 그러나 용접부에서의 잔류응력은 표면 및 깊이 방향으로 응력구배가 존재한다. 또한 잔류응력 측정뿐만 아니라 실제 구조물의 외력하에서 응력을 측정할 때에는 응력구배가 있음을 예상하여야 한다. 평형방정식을 만족시키며 응력구배가 있는 평면응력은 식 (5)로 나타낼 수 있다.

$$\sigma_1 = a_0 + a_1 X_2 \quad (5)$$

$$\sigma_2 = b_0 + b_1 X_1$$

단, a_0 : X_1 방향 균일응력

a_1 : X_1 방향 구배를 갖는 응력성분(예, 굽힘 응력)

b_0 : X_2 방향 균일응력

b_1 : X_2 방향 구배를 갖는 응력성분(예, 굽힘 응력)

X_1, X_2 : 주응력 σ_1 및 σ_2 와 방향이 일치하는 직각 평면 좌표

식 (5)로 표시되는 응력구배를 갖는 잔류응력은 미지수가 a_1, b_1, a_2, b_2 및 주응력과 게이지가 이루는 각 θ 등 5개나 된다. 5개의 스트레인 게이지가 구멍주위에 배치되는 특수한 로젯트 스트레인 게이지에 의해 5방향 스트레인을 계측함으로써, 5개의 미지수는 그해가 구하여진다⁹⁾. 그러나 상품화 된 이러한 특수한 로젯트 게이지가 아직 개발되지 않았으며, 또한 각 θ 에 의해 응력성분이 크게 변하는 함수형태이기 때문에, 실용적으로 응력구배장에서 쓰여지기에는 더욱 많은 연구가 있어야 할 것으로 믿어진다.

3. 실 험

본 연구에서 잔류응력의 측정은 잔류응력을 이완시킬 때 원형구멍 주위에서의 스트레인 변화량을 계측하는 것이기 때문에, 다른 요인에 의한 스트레인의 변화를 최소화 하여야 한다. 즉 원형 구멍을 뚫을 때 밀링 머신이나 드릴링 머신과 같은 절삭기를 사용하면 가공응력이 발생한다. 이러한 가공응력은 잔류응력과 함께 해방되어 스트레인게이지에

겉보기 스트레인(apparent strain)으로 잘못 계측된다. 가공응력에 의한 겉보기 스트레인은 Bush⁽¹⁰⁾에 의하면 $40\sim 50\mu\epsilon$, Flaman⁽¹¹⁾에 의하면 $40\mu\epsilon$ 정도로 보고되고 있으며 응력으로는 $3\sim 4\text{kg/mm}^2$ 에 상당한다.

공기 연마분사기는 공기에 50미크론의 알루미나를 혼합하여 5kg/cm^2 의 압력으로 노즐을 통해 분사시킨다. 분사된 알루미나는 가공응력을 유발시키지 않고 침식작용에 의해 응력계측 대상 구조물에 구멍을 뚫기 때문에, 특히 보통의 드릴링 머신으로 드릴링이 곤란한 높은 경도의 고장력강도 쉽게 구멍을 뚫을 수 있기 때문에, Fig. 2에 보이는 공기 연마분사기(air-abrasive jet machine, AJM)는 이 방향의 연구자(예, Bynum⁽¹²⁾)들에 의하여 사용되고 있다.

또한 두께 6mm의 연강을 600°C 에서 1시간 동안 응력풀림 처리를 한 시편을 대상으로 공기 연마 분사법으로 구멍을 뚫었을 때 0.2kg/mm^2 이하의 가공응력이 발생하였다는 실험 보고가 있다⁽¹³⁾. 따라서 본 연구에서는 공기연마 분사기에 의한 원형구멍 가공시 가공응력은 없는 것으로 간주하였다.

매우 큰 응력구배가 존재하는 잔류응력장에서 잔류응력을 정확히 계측하기 위해 4-점 굽힘시험(4-point bending test)을 하였다. 4점 굽힘 시험에

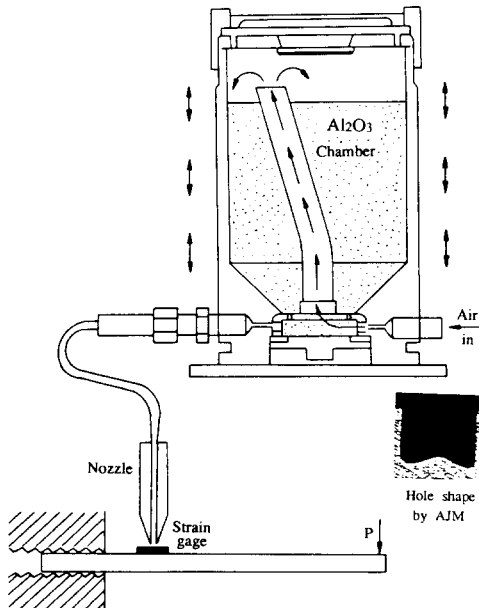


Fig. 2 Hole drilling by AJM and hole shape

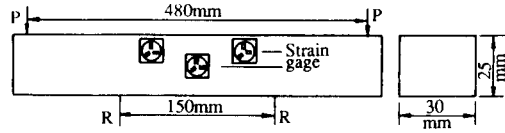


Fig. 3 4-point bending specimen for surface stress gradient

서 스트레인게이지가 부착되는 중앙 150mm구간은 굽힘 모우멘트가 일정하게 유지되도록 Fig. 3에서와 같이 하중조건을 정하였다. 따라서 굽힘 시험편의 길이 방향으로 응력의 값이 같기 때문에, 로젯트 스트레인 게이지에서 3개의 각각의 게이지는 길이 방향의 응력차이에 의한 스트레인 측정의 가능성을 배제한다.

직교 3축형 로젯트 스트레인게이지(미국 MM Group의 TEA-06-062RK-120)는 #3게이지가 굽힘 응력과 같은 방향이 되도록 부착시켰다(Fig. 4참조). 로젯트 스트레인게이지 중앙에 직경 3.2mm까지의 원형 구멍을 뚫을 수 있으나 큰 직경의 구멍인 경우 일루미나의 침식에 의해 게이지의 격자(grid)를 파괴할 수 있고 1.4mm이하인 경우는 게이지의 측정 스트레인의 크기가 작기 때문에, 끝이 막힌 원형구멍의 크기는 대략 직경 2.05mm로 하였다. 그러나 직경 2.05mm는 ASTM E837⁽¹⁴⁾에서 추천하는 하한(下限)범위상에 있다. 원형구멍 직경의 크기는 분사노즐의 크기와 노즐 시편간의 거리에 의하여 정하여 진다.

시편은 두께 25mm, 폭 30mm, 길이 500mm의 SS41연강이다. 이 시편을 약 2시간 동안 600°C 에서 응력풀림처리를 행하여, 시편제작에 앞선 공정에서 발생할 수 있는 열절단, 압연 및 밀링 가공에 의한 잔류응력을 제거하였다.

본 실험에서 하중상태는 구멍뚫기 이전에 하중을 가하기 전과 후의 계측된 스트레인 변화량으로부터 계산하는 방법을 택하였다. Fig. 3에서와 같이 게이지 위치를 정하여 대략적인 응력구배는 $0.8\sim 2.1\text{kg/mm}^2/\text{mm}$ 가 되도록 하였으며 3번 게이지 위치에서 대략 10kg/mm^2 또는 다른 응력값을 갖도록 실험을 진행하였다.

4.1 원형구멍의 진원도에 관한 결과

잔류응력장에 원형 구멍을 뚫을 때 이완되는 스트레인으로 부터 잔류응력을 계산하는 것은 대부분의 이론식이나 유한요소법 해석이 정확한 원형 구

Table 1 Diameter of the holes(measured through 4 different directions)

No.	Dia.	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	D4 (mm)	Freq.
1	2.14	2.14	2.14	2.12	2.14	1
2	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2
3	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2
4	2.04	2.04	2.02	2.04	2.04	2
5	2.04	2.04	2.04	2.04	2.04	2
6	2.08	2.08	2.08	2.10	2.08	2
7	2.00	2.00	2.02	2.00	2.00	2

멍에 입각하고 있다. 본 실험에서 여러가지 직경의 구멍을 뚫고 45°각경으로 구멍 직경을 계측하였다. 구멍 계측은 0.02mm까지 측정이 가능한 광학 현미경을 사용하였다. 그 결과는 Table 1에서 보는 바와 같다.

7개의 시편 중 3개의 시편에서 0.02mm의 직경 차이가 계측되고 있으며, 그 편차는 1%미만이다. 그런데 장축과 단축의 비가 1%인 타원일 경우, 구멍 가장자리에서의 최대 응력 집중도는 정확한 원의 것에 비하여 약 1%정도 차이가 있다⁽¹⁵⁾. 구멍 중심으로부터 2.585mm떨어진 게이지 중심에서 응력 집중도는 더욱 낮아지기 때문에, 타원형 구멍에 의한 응력집중을 원형구멍에 의한 응력 집중문제로 해석할 수 있다. 즉, 진원과 1%정도 차이가 있는 타원형 구멍의 응력 집중도는 구멍 가장자리에서 약 3이며 게이지 중심 위치에서는 원형 구멍과 비슷하게 1.12로 예상되기 때문에, 원형 구멍에 입각한 Kirsch해 또는 유한요소법 해석을 원에 가까운 타원형 구멍에 적용할 수 있다. 또한 응력이완에 의하여 구멍 주위에서 보통 100 $\mu\epsilon$ 의 스트레인이 계측되기 때문에 원형 구멍의 타원형 구멍으로의 일그러지는 효과는 무시하여도 무방하다.

4.2 구멍지름의 측정오차

구멍 뚫기에 의하여 응력을 이완시켜 잔류응력을 측정할 때, 구멍 직경은 저배율 현미경 또는 확대경을 사용하여 계측한다. 저배율 광학 현미경에 의한 구멍 직경 측정시는 0.02mm, 일반확대경을 사용할 경우는 0.1~0.2mm, 육안 측정인 경우는

0.4mm까지 잘못 측정할 수 있다.

구멍의 지름 측정오차가 주응력의 크기에 미치는 영향을 알아보기 위해 식 (2)를 a 에 관하여 미분하면

$$\frac{d\sigma}{da} = \left(-\frac{2}{a}\right) \left[\sigma - \frac{3(\epsilon_1 - \epsilon_3)}{4B^2} \cdot \frac{1+\nu}{2E} \rho^4 \cos 2\theta \right] \quad (6)$$

양변을 σ 로 나누고 정리하면

$$\frac{d\sigma}{\sigma} = (-2) \left[1 - \frac{3}{8} \cdot \frac{(\epsilon_1 - \epsilon_3)}{\sigma} \cdot \frac{1}{B^2} \cdot \frac{1+\nu}{E} \rho^4 \cos 2\theta \right] \frac{da}{a} \quad (7)$$

식 (7)에서 알수 있는 바와 같이 잔류응력 측정 오차는 구멍의 크기(ρ), 재료의 특성(ν , E) 및 하중상태(ϵ , σ , $\cos 2\theta$) 등에 의하여 그 크기가 정하여진다. 본 실험에서 사용한 직교 3축형 로켓트 게이지를 연강시편에 부착하여 직경 2.05mm의 구멍을 뚫고 $(\epsilon_1 - \epsilon_3)/\sigma$ 비를 $27.5 \times 10^{-6} \text{mm}^2/\text{kg}$ 으로 θ 를 0으로 가정하면

$$\frac{d\sigma}{\sigma} = -1.8 \frac{da}{a} \quad (8)$$

본 실험에서는 저배율 광학 현미경을 사용하여 0.02mm까지 직경을 정확히 계측할 수 있었다. 따라서 본 실험의 경우 구멍 직경의 계측 오차에 의한 응력 계측 오차는 약 2% 정도로 믿어진다. 그러나 직경 계측 오차가 5%를 넘으면 응력 계측에 무시 못할 정도의 영향을 미친다. 직경 계측 오차를 5%이하로 줄이기 위해서는 20배 정도의 확대경을 사용하여 직경을 계측하는 것이 바람직하다.

4.3 4-점 굽힘시험

4-점 굽힘시험(Fig. 3 참조)등에서 응력분포는 보의 두께 방향으로만 변한다. 또한 용접잔류응력인 경우 용접부 근방에서 인장응력이 조금 떨어진 곳에서 압축응력이 존재하여, 용접선에 수직인방향으로 잔류응력의 구배가 있다. 이와같이 응력구배가 존재하는 부재의 잔류응력을 계측하는 보정시험 방법으로 4-점 굽힘시험을 이용하였다.

균일분포의 2축 응력장에서 스트레인 게이지를 사용하여 응력분포를 알아내고자 할때, 주응력은 식 (9)에 의해 계측된 스트레인으로 부터 계산된다.

$$\epsilon_x = \frac{1}{2E} \{ (1-\nu)(\sigma_1 + \sigma_2) + (1+\nu)(\sigma_1 - \sigma_2) \times \cos 2\theta \} \quad (9)$$

4-점 굽힘시험에서 보의 길이 방향을 주응력 방

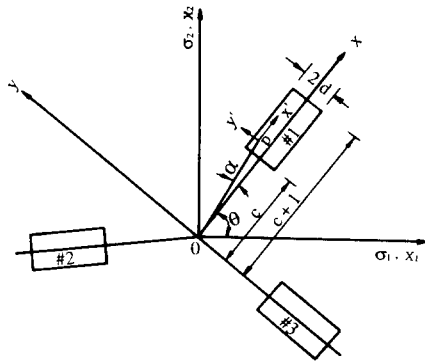


Fig. 4 Position of rosette strain gage and direction of principal stress

향(Fig. 4에서 σ_1 방향)으로 가정하면, 보의 두께 방향으로 선형적인 응력구배를 갖는다.

$$\sigma_1 = a_0 + a_1 X_2 \quad (10)$$

a_0 : 로젯트게이지 중심(Fig. 4에서 0)에 걸리는 X_1 방향 균일응력 성분(kg/mm^2)

a_1 : X_1 방향(4-점 굽힘시험편의 축방향)응력 중 구배응력 성분($\text{kg}/\text{mm}^2/\text{mm}$)

X_2 : 4-점 굽힘시험편의 두께방향 좌표

보의 두께방향으로의 주응력(σ_2)을 0으로 가정하고, x_1-x_2 좌표계로 표시된 식 (10)을 $x-y$ 좌표계로 변환하여 식 (9)에 대입한다. 또한 스트레인이 지내의 임의 점 P 는 스트레인이 지내 축과 a 각을 이루기 때문에, P 점에서의 스트레인은

$$\epsilon_x = \frac{1}{2E} [a_0 + a_1(x \sin \theta + y \cos \theta)] [(1 - \nu) + (1 + \nu) \cos 2(\alpha + \theta)] \quad (11)$$

스트레인이 지내의 계측값인 ϵ_x 의 평균치는

$$\epsilon_1 = \frac{1}{2} \frac{1}{d} \int_c^{c+1} \int_a^d \epsilon_x x dy \quad (12)$$

ϵ_1 은 로젯트 게이지중 #1 게이지의 계측치임을 나타낸다. 본 연구에서 사용한 직교 3축형 로젯트 스트레인이 지내인 경우, θ 대신 각각 $135 + \theta$, $270 + \theta$ 를 식 (12)에 대입하여 $\nu = 0.3$ 이라는 가정하에 ϵ_2 및 ϵ_3 을 구하면,

$$E\epsilon_1 = (0.35 + 0.6095 \cos 2\theta) a_0 + (0.9 \sin \theta + 1.5655 \cos 2\theta \sin \theta - 2.7153 \sin 2\theta \cos \theta) a_1 \quad (13-a)$$

$$E\epsilon_2 = (0.35 + 0.6095 \sin 2\theta) a_0 + \{0.6364 (\cos \theta - \sin \theta) + 1.107 \sin 2\theta (\cos \theta - \sin \theta) - 1.92 \cos 2\theta (\cos \theta + \sin \theta)\} a_1 \quad (13-b)$$

$$E\epsilon_3 = (0.35 - 0.6095 \cos 2\theta) a_0 + (-0.9 \cos \theta + 1.5665 \cos 2\theta \cos \theta + 2.7153 \sin 2\theta \times \cos \theta) a_1 \quad (13-c)$$

식 (13)은 선형의 응력구배가 있는 1축 응력장에서 직교 3축형 로젯트 게이지를 이용하여 일반 응력을 계측하는데 사용될 수 있다. 즉 식 (13)은 로젯트 스트레인이 지내내에 구멍 등에 의한 응력 집중없이 외력에 의한 응력구배가 주어질 때 사용될 수 있다.

본 연구에서 식 (13)의 적용가능성을 알아보기 위해 4-점 굽힘시험편(구멍뚫기전)에 크기가 다른 인장 및 압축하중이 게이지 중심에 걸리도록 하여 스트레인을 계측하였다. 이때, 로젯트 스트레인이 지내의 중심위치는 중립축과 최대 굽힘응력이 작용하는 면의 중간지점(중립축으로부터 약 6mm)으로 하였다(#6과 #9는 예외). 각각의 하중상태 조건하에 게이지로부터 계측된 스트레인을 식 (13)에 대

Table 2 Loading stresses in 4-point bending specimens

Gage identification	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9
Gage location h (mm)*	6	6	-6	6	-6	-5	6	6	0
Uniform S. a_0 (kg/mm^2)	11.63	10.89	5.10	11.88	-8.76	-4.11	12.54	12.33	0.36
Grad. S. a_1 ($\text{kg}/\text{mm}^2/\text{mm}$)	1.99	2.06	0.95	2.07	1.55	0.87	2.12	2.11	1.97
$a_0 \cdot h$	1.94	1.82	0.85	1.98	1.46	0.82	2.09	2.06	**2.06

* h : Location of the rosette gage center away from the neutral axis. Negative h stands for the zone of the compressive stress in the 4-point bending specimens.

**Value is taken from #8 gage because the loading condition is same for #8 and #9 but gage locations are different each other.

입하여 균일응력과 구배응력을 구하였으며 그 결과를 Table 2에 나타내었다.

Table 2에서 a_0/h 는 분명히 선형 응력구배를 나타내기 때문에 식 (13)으로 부터 계산된 a_1 과 비교될 수 있다. Table 2에서 알 수 있는 바와 같이 a_1 과 a_0/h 는 서로 약간의 차이는 있지만, 1축 응력구배장에서 식 (13)을 사용하여 게이지 중심에서의 응력과 응력구배를 계측할 수 있다. 왜냐하면 a_1 과 a_0/h 의 차이는 대부분 10% 이내이며, 그 차이도 h 의 계측오차($\pm 0.5\text{mm}$)에 기인하는 것으로 믿어지기 때문이다. 특히, #9게이지는 중립축 상에 위치하여 a_0 값이 작아도 실제의 응력구배인 #8게이지의 a_1 과 서로 잘 일치하여 식 (13)의 사용타당성을 높여주고 있다.

반면에 2축 균일응력장에 구멍을 뚫었을 때, 구멍 주위의 응력집중에 의한 스트레인 게이지내의 임의의 점에서의 스트레인 ϵ_x 은 ϵ_r [식 (1)] 및 ϵ_θ 를 구하여 좌표변환을 통해 얻어진다. 본 연구에서 사용한 스트레인 게이지의 전면적에 대하여 ϵ_x 을 적분하고 프와송비를 0.3으로 가정하면,

$$E\epsilon_x^R = -0.0968a^2(\sigma_1 + \sigma_2) + (-0.2561a^2 + 0.0413a^4)(\sigma_1 - \sigma_2)\cos 2\theta \quad (14)$$

단, ϵ_x^R 은 구멍을 뚫었을 때 직교 게이지가 계측하는 잔류 스트레인.

ϵ_x^R 및 ϵ_y^R 은 식 (14)에서 θ 대신 $\theta + 135^\circ$, $\theta + 270^\circ$ 을 대입하여 얻어진다.

Fig. 5는 4-점 굽힘시험편에 하중을 가한 상태에서 구멍을 뚫었을 때, 이완되는 스트레인을 계측하여 잔류응력(4-점 굽힘에 의한 작용응력)을 측정하는 결과를 보여주고 있다. 가로축에는 Table 2에 표시된 응력을 나타내며, 세로축에 계측된 응력을 나타낸다. 스트레인 게이지내의 응력구배를 고려한 계산식 식 (14)를 사용하여 계산된 응력값이 실제 응력값(load stress)보다 약간 크게 나타나며, 스트레인 게이지를 점으로 간주하여 계산 [식 (2)]한 응력값은 10%범위 내에서 잘 일치하고 있다. 또한 4-점 굽힘시험편에 존재하는 응력구배를 무시하고 일반적으로 2축 균일 응력이라고 가정한 하중상태(구멍을 뚫기 전)에서의 응력값 [식 (9)로 부터 계산한 결과]을 Fig. 5에 나타내었다. (Fig. 5에서 uniform load stress로 표시됨) 이 경우 실제하중 상태보다 약간 작게 평가되고 있으나 10%범위에서 실제 작용응력(Table 2에 표시된 값)과 잘 일치하고 있다. 한편 계측오차를 표시하는데 있어서는 식 (13)으로 부터 계산된 오차와 비교할 때 큰 양의 오차를 초래할 수 있다. 그러나 구멍을 뚫기 전에 응력구배가 작은 작용응력을 평가하는데는, 식 (9)에 의해 계측된 스트레인으로 부터 응력을 계산할 수 있을 것이다. 이러한 방법으로 알아낸 작용응력과 구멍을 뚫었을 때 이완되는 스트레인으로 부터 계산된 응력(잔류응력)을 비교하여 계측오차 범위를 평가할 수 있다.

5. 결 론

표면방향의 응력구배가 심한 구배조건에서 잔류응력 측정에 관한 보정실험을 할때, 4-점 굽힘시험은 비교적 간편하게 사용될 수 있다. 그러나 구멍을 뚫기 전 하중 상태에서 로젯트 스트레인 게이지의 응력구배를 고려하여 실제하중을 산정하는 것이 바람직하다. 균일 응력장에 근거한 작용응력의 산정은 실제응력보다 과소 평가될 수 있다.

3축 로젯트 게이지를 사용하여 구멍뚫기 방법으로 10%오차범위내에서 표면 잔류응력을 측정할 수 있다. 이때 계측된 이완 스트레인으로 부터 잔류응력을 환산하는 변형률이완상수는 Kirsch해에 입각한 것이 오차가 비교적 작은 잔류응력 측정치를 나타내고 있다. 스트레인 게이지내의 응력 구배를 고려하여 더욱 엄밀하게 정의된 스트레인 이완상수는 실제응력보다 약 10% 큰 잔류응력 측정치를 나타

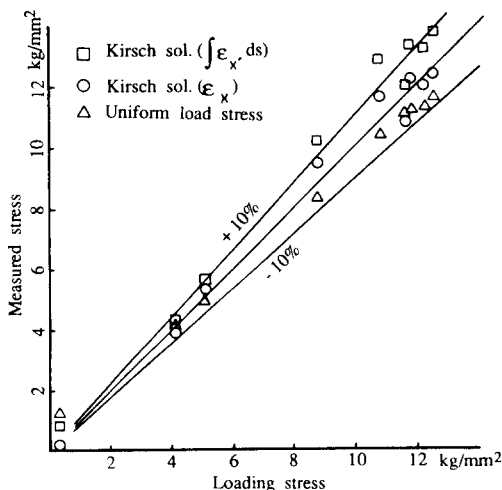


Fig. 5 Residual stresses calculated from different strain relieved coefficients

내고 있다. 그 이유는 막힌구멍으로 부터 이완되는 변형률이완상수가 관통형 구멍으로부터 이완된 상수보다 적은값에 기인할 것으로 믿어진다.

HDM에 의한 잔류응력 측정시 구멍직경의 측정 오차가 잔류응력 측정에 큰 영향을 미치지 않기 위하여, 25배율 정도의 확대경을 사용하여 0.02mm의 공차범위내에서 구멍의 지경이 측정되어야 한다.

후 기

본 연구는 1988년도 문교부 지원 한국학술진흥재단의 자유공모과제 학술연구 조성비에 의하여 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 포함합니다. 또한 연구 기자재등의 편의제공을 하여준 한국기계연구소 부설 해사기술연구소에 감사의 뜻을 포함합니다.

참 고 문 헌

- (1) Mathar, A., 1934, "Determination of Initial Stresses by Measuring the Deformation Around Drilled Holes", Trans. ASME, Vol. 56, No. 4.
- (2) Timoshenko, S.P., Goodier, J.N., "Theory of Elasticity", McGraw-Hill, New York, pp. 90~92.
- (3) Schajer, G.S., 1981, "Application of Finite Element Calculations to Residual Stress Measurements", Trans. ASME, J. of Engineering Materials and Technology, Vol. 103, pp. 157~163.
- (4) Kabiri, M., 1986, "Toward More Accurate Residual-Stress Measurement by the Hole-Drilling Method: Analysis of Relieved-Strain Coefficients", Experimental Mechanics, Vol. 26, No. 3, pp. 14~21.
- (5) Kelsey, R.A., 1956, "Measuring Non-uniform Residual Stresses by the Hole Drilling Method", strain J., BSSM, Vol.4, No. 2, pp. 20~29.
- (6) Bathgate, R.G., 1968, "Measurement of Non-uniform Residual Stresses by the Hole Drilling Method", Strain J., BSSM, Vol. 4, No. 2, pp. 20~29.
- (7) Rendler, N.J., Vigness, I., 1966, "Hole-drilling Strain-gage Method of Measuring Residual Stresses", Experimental Mechanics, Vol. 6, No. 12, pp. 577~586.
- (8) Beany, E.M., Procter, E., 1974, "A Critical Evaluation of the Centre Hole Technique for the Measurement of Residual Stresses", Strain J., BSSM, Vol. 10, No. 1, pp. 7~14.
- (9) Kabiri, M., 1984, "Nonuniform Residual-stress Measurement by Hole-drilling Method", Experimental Mechanics, Vol. 24, No. 12, pp. 328~336.
- (10) Bush, A.J., Kromer, F.J., 1973, "Simplification of the Hole-Drilling Method of Residual Stress Measurement", ISA Transactions, Vol. 12, No. 3, pp. 249~259.
- (11) Flaman, M. T., 1982, "Brief Investigation of Induced Drilling Stresses in the Center-hole Method of Residual-stress Measurement", Experimental Mechanics, Vol. 22, No. 1, pp. 26~30.
- (12) Bynum, J.E., 1981, "Modifications to the Hole-drilling Technique of Measuring Residual Stresses for Improved Accuracy and Reproducibility", Experimental Mechanics, Vol. 21, No. 1, pp. 21~33.
- (13) 전상윤, 1989, "구멍뚫기 방법(HDM)에 의한 잔류응력 測定에 관한 研究", 영남대학교 대학원 석사논문.
- (14) 1982, "A Standard Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Method", ASTM Annual Book of Standards, 82nd ed., Part 10.
- (15) Peterson, Stress Concentration Design Factors, John Wiley & Sons, Inc., p. 88.